

Anna Rantala

TERMISEN VOIMALAITOKSEN SAVUPII- PUN SAVUNOUSEMAN KORKEUDEN MÄÄRITYS JA ALUEELLISEN HIUKKAS- KONSENTRAATION LASKENTA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Henrik Tolvanen
05/2019

SISÄLLYS

TERMIEN SELITYKSET	1
1.JOHDANTO	2
2.SAVUNOUSEMA VOIMALAITOKSEN PIIPUSTA.....	4
2.1 Savunousema ilmiönä.....	5
2.2 Savunouseman laskenta.....	7
2.2.1 Briggsin korrelaatio	8
2.2.2 Hollandin korrelaatio	9
2.2.3 Carson-Moses -korrelaatio.....	9
2.2.4 Erikoistapaukset	9
2.2.5 Savukaasun kemiallinen koostumus	10
3.ILMANSAASTEIDEN LEVIÄMISMALLIT.....	12
3.1 Gaussin dispersiomalli	12
3.2 Sovelletut dispersiomallit.....	14
3.3 Virtaustyyppiset dispersiomallit	15
4.TUTKIMUSMENETELMÄT	17
4.1 Hervannan hakelämpölaitoksen piippu.....	18
4.2 Hervannan öljylämpökeskuksen piippu	19
5.TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	21
5.1 Korrelaatioiden tulokset.....	21
5.2 Hiukkaskonsentraatiot Gaussin mallin mukaan	24
6.YHTEENVETO.....	27
LÄHTEET.....	28

TERMIEN SELITYKSET

c_j	absorboituva/heijastuva hiukkaskonsentraatio	mol/dm ³
H_e	tehollinen korkeus	m
h_s	piipun korkeus	m
Δh	savunouseman korkeus	m
F_b	lämpösisältöparametri	m ⁻³
d	piipun halkaisija	m
v_s	savukaasun nopeus	m/s
Q_h	savukaasun lämpöteho	W
Q	lämpöarvo	J/kg
u	tuulen nopeus	m/s
v_0	tuulen nopeus vertailukorkeudella	m/s
v	tuulen nopeus piipun korkeudella	m/s
z_0	vertailukorkeus	m
z	korkeus	m
k	vakiokerroin	(-)
σ_y	vaakasuoran suunnan dispersiokerroin	(-)
σ_z	pystysuoran suunnan dispersiokerroin	(-)
x	vaakasuora etäisyys pistelähteestä	m
R_u	yleinen kaasuvakio	J/molK
p	paine	Pa
\dot{N}	moolivirta	mol/s
Q, \dot{V}, R'	tilavuusvirta	m ³ /s
\dot{m}	massavirta	kg/s
V	tilavuus	m ³
Φ	kattilateho	W
M	savukaasun lämpövirta	W
c_p	ominaislämpö vakiopaineessa	kJ/kgK
T, T_s	savukaasun lämpötila	K
T_a	ilman lämpötila	K
a, b, c, d, f	sääolosuhteille ominaisia kertoimia	(-)

1. JOHDANTO

Terminen voimalaitos tuottaa lämpöä polttamalla runsasenergiaisia yhdisteitä kattilassa. Laitos voi myös olla lämmön- ja sähköntuotannon yhdistävä CHP-laitos (combined heat and power), jolloin osa palamisenergiasta varastoidaan suoraan lämpönä ja osa muunnetaan sähköksi kiertoineen mekaanisen energian avulla. Palamisessa voi lisäksi muodostua sivutuotteena yhteiskunnallisesti merkittäviä määriä terveydelle haitallisia yhdisteitä. Savukaasu koostuu höyrystyneen veden ja kaasumaisten yhdisteiden lisäksi nestepisaroista, pienistä kiinteistä saastepartikkeleista ja aerosoleista [14]. Paikallisen ilmanlaadun pilaantumisen estämiseksi voimalaitosten savupiiput suunnitellaan aina muuta maastoa huomattavasti korkeammiksi. Piipuissa voi olla lisäksi sadepäällälyksiä [10] suojaamassa savukaasuja liialliselta jäähtymiseltä [14].

Savunousema on taivaalle emittoituva näkyvien pienhiukkasten muodostama hetkellinen keskittymä. Profiilin muoto vaihtelee, koska partikkelit liikkuvat ajan suhteen. Runsaasenergiaisen aineen palamistuotteina syntyneet kaasut johdetaan ulos piipusta. Paitsi että savukaasut pyritään saamaan mahdollisimman kauas maanpinnasta, 100 m korkeudessa tuuli on selvästi voimakkaampaa [22], mikä edistää savukaasun sekoittumista ilmaan. Savupiippujen korkeuksilla ei myöskään ole kasvillisuutta tai rakennuksia estämässä savun leviämistä.

Savukaasun nousu ylöspäin johtuu nosteesta ja liikemäärästä [12]. Savunouseman korkeuteen vaikuttavia ulkoisia tekijöitä on paljon ja se tekee korkeuden tarkasta määrittämisestä haastavaa. Ympäristön ominaisuudet, kuten maaston pinnanmuodot, tuulen nopeus ja suunta, ilman ja savukaasun kosteus [21], paine, lämpötila, vuorokauden- ja vuodenaika ja maantieteellinen sijainti vaikuttavat tulokseen. Kirjallisuudessa esiintyy savunouseman laskemiseen tarkoitettuja yksinkertaistettuja korrelaatioita, jotka perustuvat kokeellisiin mittauksiin. Kappale 2 käsittelee savunousemaa ilmiön ja laskennan kannalta.

Savunousemalle on olemassa useita emissioprofiileja, joiden perusteella korkeutta ennustetaan. Korkeutta on laskettu aiemmin eksplisiittisillä savunousemayhtälöillä, joilla epätarkkuutta ei voinut välttää. Nykyään algoritmit on korvattu kiinteillä vertikaalisilla emissioprofiileilla, jotka perustuvat mittauksiin usean vuoden ajalta. Tällöin profiileissa on jo huomiotu sää ja muiden tekijöiden satunnaiset vaihtelut, joten emissioprofiileita voidaan pitää savunousemayhtälöitä luotettavampina. Esimerkiksi yleisesti käytetty European Monitoring and Evaluation Program (EMEP) on luotu Zagrebissa viiden vuoden mittauksen pohjalta. Vertikaaliset mallit taas ottavat perinteisiä korrelaatiota paremmin huomioon meteorologiset reunaehdot.[9]

Pistemäisten lähteiden savukaasuemissioita voidaan tutkia myös aluemitakaavassa ilmansaasteiden leviämismallien avulla. On olemassa viisi lähtökohdiltaan erilaista leviämismallia: laatikko-

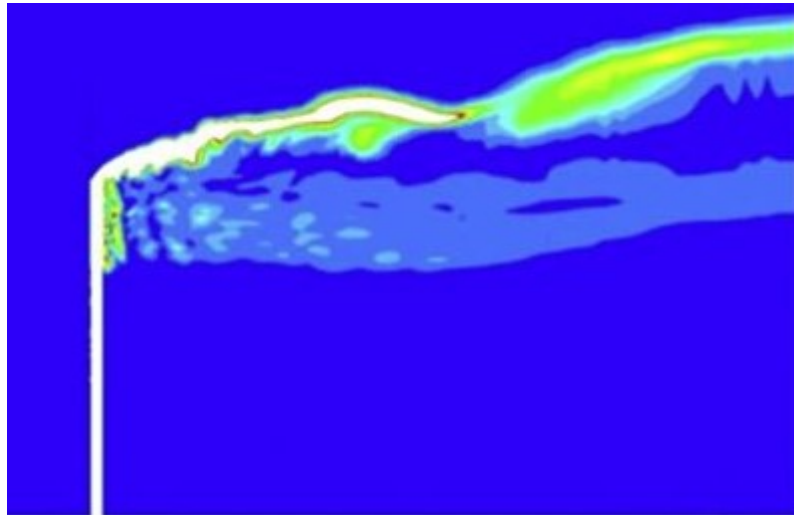
, gauss-, euler-, lagrange- ja virtaustyyppinen malli. Dispersiomallit ennustavat hiukkaskonsentraatioita etäisyyden funktiona päästölähteestä. Osa leviämismalleista esitellään kappaleessa 3. Tässä työssä käytettävässä gaussilaisessa mallissa ilmansaasteiden pitoisuus vaakasuuntaisen etäisyyden funktiona noudattaa normaalijakaumaa.[17] Työn tarkoitus on pohtia seuraavia kysymyksiä:

- *Miksi savunouseman laskenta on merkityksellistä?*
- *Mitä keinoja laskentaan nykyään käytetään ja kuinka relevanttia yksinkertaistettujen korrelaatioiden käyttö on?*
- *Toimivatko korrelaatiot kuinka hyvin case-tarkastelussa?*

Kappaleessa 4 savunouseman korkeus lasketaan kahdelle Hervannassa sijaitsevalle savupii-
pulle kuvan avulla, verrataan sitä korrelaatioiden tuottamiin tuloksiin ja sen perusteella arvioidaan korrelaatioiden toimivuutta yksittäistapauksessa. Todellisuuden kannalta käyttökelpoisen kaavan tulee tuottaa oikean suuntainen tulos myös muissa kuin tarkoin säädellyissä olosuhteissa.

2. SAVUNOUSEMA VOIMALAITOKSEN PIIPUSTA

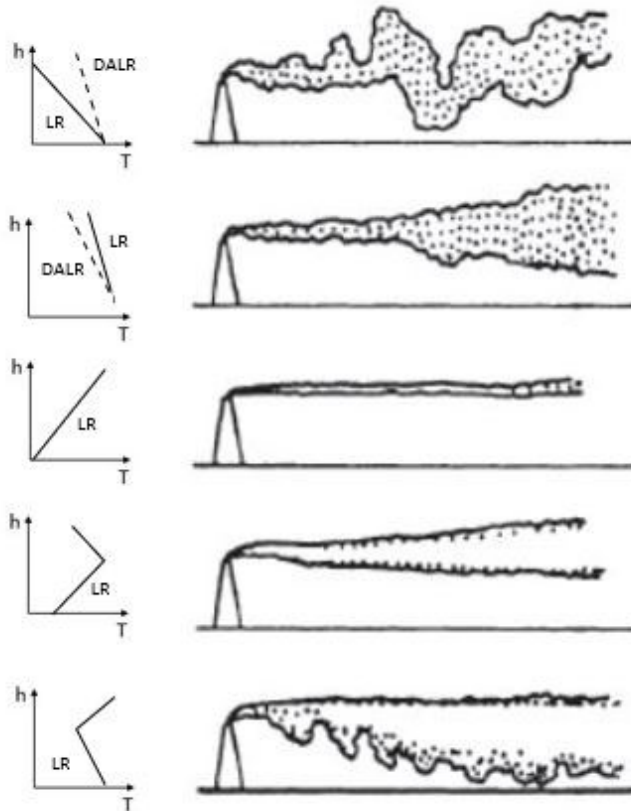
Voimalaitosten polttoprosesseissa piipusta vapautuvat savukaasut ovat tavallinen teollisuusympäristön ilmiö. Savu koostuu kaasumaisten yhdisteiden lisäksi läpimitaltaan 1-50 μm kokoisista kiinteistä hiukkasista, vesipisaroista ja aerosoleista [14].



Kuva 1. Lämpökuva savupiipusta. Savukaasun nostevoimat aiheuttavat epäsuorasti ympäröivään ilmaan turbulenteja virtauksia, jotka taas saavat savukaasun nousemaan ylöspäin.[2] Muokattu lähteestä [2].

Ilman lämpötilan muutokset korkeuden suhteen on tärkein tekijä määritettäessä savukaasun turbulenssia ja diffuusionopeutta ympäröivään ilmaan. Sitä kuvaa termi "lapse rate" (LR). Kuvassa 2 erinäköiset savuprofiilit havainnollistavat termin merkitystä savunouseman muotoon ja korkeuteen. DALR, "dry-adiabatic lapse rate", tarkoittaa lämpötilan muutosta ylöspäin nousevalle kuivalle ilmalle. Yksikkö on $-1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. [1] DALR on eräänlainen vertailuarvo, kun tarkastellaan todellista lämpötilan muutosta LR. Kuvan 2 ylimmässä kuvassa savu tekee pyörteitä. Ilmiö on tavallinen päiväsaikaan selkeällä säällä, jolloin auringon säteily aiheuttaa epästabiilisuden, kun se vaikuttaa ilman lämpötilaan korkeuden suhteen. Poikkeuksena ovat pilvinen tai tuulinen sää tai lumisade, jolloin savu ei tee silmukoita. Seuraavassa kuvassa taas savu leviää kartiomaaisesti etenemissuuntaansa. Tämä on neutraali tai heikosti epästabiili tilanne ja se on tavallinen erityisesti pilvisellä tai tuulisella säällä, vuorokaudenajasta riippumatta. Keskimmaisessä kuvassa savuvana etenee hyvin ohuena ja vaakasuorana, jolloin taivas on usein pilvetön ja tuuli heikkoa. Savunousema on tällä tavalla stabiili erityisesti yöaikaan tai korkeilla paikoilla. Toiseksi alimman kuvan savunousema vaihtuu epästabiilista stabiiliksi, mikä on yleistä juuri auringonlaskun aikaan. Edellisestä poiketen savu muodostaa vahvoja pyörteitä, jotka tunkeutuvat yläpuolella olevaan ilmakerrokseen. [1] Savun muoto on hieman nouseva, kun edellinen oli vaakasuora. Viimeisessä kuvassa savunousema muuttuu stabiilista epästabiiliksi ja pyörteet laskevat alaspäin. Myöhään

aamupäivällä tai varhain iltapäivällä, kun aurinko on ehtinyt lämmittää ilmaa ja haihduttaa yöllä kerääntyneen kosteuden, kylmenevä ilmakerros on savukaasun yläpuolella.[1] Savunousema on sen takia ylhäätä sileää, kun taas alhaalla on pyörteitä.



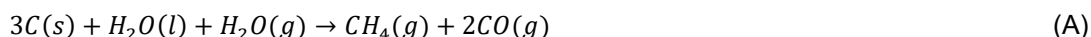
Kuva 2. Savunouseman muoto riippuu sään ja sijainnin lisäksi jopa vuorokaudenajasta. Muokattu lähteestä [1].

2.1 Savunousema ilmiönä

Savukaasun ääriviivat erottuvat usein selkeästi taivaalla ja partikkulien sameudella on yhteys savukaasun tiheyteen. Kaasun läpinäkyvyys riippuu ensisijaisesti hiukkasten tilavuudesta eikä niinkään massasta.[14] Epäorgaaninen savukaasu koostuu hiilen, typen ja rikin oksideista, ammoniakista, syanideista, otsonista, halogeeneista, halideista ja CFC-yhdisteistä [1]. Orgaaninen kaasu puolestaan sisältää mm. aromaattisia hiilivetyjä, parafiineja, orgaanisia happoja ja alkoholeja, alifaattisia happiyhdisteitä, asetyleeniä, ketoneja ja aldehydejä [1].

Väritään savu voi olla mustaa tai vaihdella tummasta haaleaan harmaaseen ja valkoiseen. Kaasu on vaaleaa, kun sen lämpötila piipussa on 150–260 °C.[14] Tällöin hiilivedyt kaasuuntuvat tai hajovat helposti [14] ja reagoivat välittömästi lopputuotteikseen, hiilidioksidiksi ja vedeksi, koska korkeissa lämpötiloissa palaminen on melko puhdasta. Joskus hapen määrä palamisprosessissa on riittämätön, jolloin erityisesti orgaanisten polttoaineiden tapauksessa vapautuu puhtaiden re-

aktiotuotteiden ohella osittain hapettuneita hiiliyhdisteitä.[14] Jos hiilivedyt palavat heikosti, savukaasuihin voi päätyä jopa alkuainehiiltä, jolloin kaasu on lähes mustaa. Esimerkiksi tässä työssä tarkasteltujen laitosten savukaasun lämpötilat piipussa ovat alle 150 °C, joten savukaasu ei määritelmän mukaan voi olla väriltään valkoista. Kaasuja voidaan kuitenkin puhdistaa johtamalla ne takaisin tulipesään. Pyrkimyksenä on, että toisella kierroksella puutteellisesti palaneet hiili-happiyhdisteet palavat loppuun asti. Savukaasuihin päätynyt hiili muodostaa veden kanssa metaania ja hiilimonoksidia reaktioyhtälön [11]



mukaisesti. Reaktioyhtälössä kiinteä hiili on pieninä hiukkasina savukaasun joukossa. Häkä eli hiilimonoksidi taas on hajuton ja mauton myrkyllinen kaasu ja metaani tehokas kasvihuoneilmiön edistäjä. Näistä tuotteista yritetään päästä eroon [14] polttamalla yhdisteet uudelleen, jolloin vapautuu hiilidioksidia ja vettä [11]:



Ilmansaasteet voidaan jakaa kehittymisen perusteella kahteen ryhmään: primäärinen ilmansaaste on suoraan lähteestä emittoituva hiukkanen, kun taas sekundäärinen ilmansaaste syntyy ilmakehässä kaasun reagoidessa haitalliseksi yhdisteeksi. Savukaasu voi olla olomuodoltaan kokonaan kaasumainen [1] ja koostua ideaalikaasun tavoin pistemäisistä hiukkasista tai suurikokoisista reaalihiuksista, joiden fysikaaliset ominaisuudet täytyy huomioida. Savukaasunouseman korkeuteen vaikuttavat noste, liikemäärä, kulmaliikemäärä ja hitausmomentti riippuvat jokaisen partikkelin massasta, rakenteesta ja ominaislämmöstä. Voimalaitosten tuottama savukaasu oletetaan usein reaalikaasuksi eli hiukkasten törmäykset ovat epäelastisia, mikä hidastaa kaasun liikettä. Hiukkasten keskinäiset vuorovaikutukset lisäävät fluidin sisäistä kitkaa eli viskositeettiä. Kaasuilla viskositeetti kasvaa lämpötilan kasvaessa.

Savukaasut liikkuvat piipussa ylöspäin nosteen ja liikemäärän ansiosta [12]. Savukaasun käyttäytymistä voidaan verrata kuivaan ilmaan. Ulkoilma on viileämpää kuin savukaasu ja siinä voi säästä riippuen olla runsaasti kosteutta. Kylmä ja kostea ilma on tiheämpää kuin lämmin kuiva ilma, joten savukaasuun vaikuttavat ylöspäin suuntautuvat nostevoimat. Noste on hallitsevampi kuin kaasun terminen satunnaisliike, joka aiheuttaa liikemäärän. Kun savukaasu tulee ulos piipusta, virtaus muuttuu turbulentiksi 0-5 piipun halkaisijan mitan päässä kohtisuoraan suuntaan [12]. Kuitenkin ilman satunnaiset pyörteet ja virtaukset määräävät savuprofiilin lopullisen muodon. Savunousema on yleensä korkeampi kuin piippu, mutta matalapaineella korkeus voi olla myös piipun tasolla tai alempana.[10]

Päästölähteitä on kolmea eri tyyppiä. Kaikki voimalaitokset ja rakennukset, joissa savukaasua emittoituu pääasiassa yhdestä paikasta, ovat pistelähteitä [9]. Muussa tapauksessa ne ovat alue- lähteitä [9] tai tilavuuslähteitä [10]. Kirjallisuudessa puhutaan myös linja- ja aluelähteistä, jotka liittyvät yhdyskuntien liikenneverkostoihin ja asuinalueisiin [9]. Mikäli lähteen ominaisuudet eivät vastaa mitään standardoitua mallia, kohde oletetaan tilavuuslähteeksi [10]. Esimerkiksi rakennukset ovat tilavuuslähteitä [10], koska lämpöä siirtyy kolmiulotteisesti talon rakenteiden läpi. Tilavuuslähteen tuottama emissio on mahdollista mitata, sillä sisä- ja ulkoilman hiukkaspitoisuudet ovat usein keskenään selvästi erilaisia. Eridimensioisille malleille on olemassa erityisiä laskukäytännöjä [21], mutta toisaalta linja- ja aluemallit voidaan jakaa useamman pistelähteen muodostamiin kokonaisuuksiin [9]. Siksi joissain tapauksissa pelkkä yksittäisten pistelähteiden emissioiden määrittäminen riittää.

Voimalaitosten ja muiden savukaasuja emittoivien lähteiden ylläpito vaatii ympäristöluvan, jonka hakemista varten täytyy tehdä yksityiskohtainen arvio laitoksen käytöstä aiheutuvista perustason hiukkaskonsentraatioista, "ground-level concentration" (GLC) [1]. Savukaasun alueellinen pitoisuus riippuu siitä, miten tehokkaasti se leviää ja sekoittuu ympäröivään ilmaan. [1] Kaikkien vaikuttavien osatekijöiden huomiointi on varsin haasteellista, koska laskentamenetelmät ovat rajalliset.

2.2 Savunouseman laskenta

Savunouseman korkeus tarkoittaa kohtisuoraa etäisyyttä savukaasun poistumisaukosta savuprofiilin keskiviivan yläpään pisteeseen. Lähtötietoja ovat savupiipun korkeus ja sisähalkaisija, savukaasun virtaama ja lämpötila piipussa. Sääolosuhteista on tunnettava tuulen nopeus, lämpötila ja paine [10]. Savunousemakaavojen perustason hiukkaskonsentraatio on kääntäen verrannollinen tehollisen korkeuden neliöön. Tietoa savunouseman korkeudesta tarvitaan, kun suunnitellaan uusia voimalaitoksia.[20]

Savukaasuprofiilin kehitys voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Aluksi kaasun oma, termisestä energiasta johtuva pyörteily, on vallitsevin muodon määräävä tekijä. Toisessa vaiheessa kaasun massa vuorovaikuttaa pyörteisiin ilmakehän virtausten kanssa. Viimeisenä ilmakehän pyörteet määrittävät täysin savukaasun etemis- ja pyörimisliikkeen.[2] Savukaasu on tässä vaiheessa jäähtynyt ja sekoittunut ilmaan, joten lämpöliike ei enää aiheuta pyörteilyä. Massallakaan ei ole enää juuri vaikutusta liikkeeseen, koska paikallinen hiukkaskonsentraatio on pieni. Savunouseman korkeus mitataan todennäköisesti ensimmäisen ja toisen tarkasteluvaiheen välissä.

Ilman lämpötila "muuttuu pystysuunnassa adiabaattisesti" kun lämpötila laskee 1 °C jokaista sataa metriä kohti, kun tarkastellaan lämpötiloja maan pinnasta ylöspäin [22]. Lisäksi tuulen nopeus

kasvaa logaritmisesti korkeuden funktiona. Jos tunnetaan tuulen nopeus v_0 jollakin korkeudella z_0 , voidaan laskea tuulen nopeus v halutulla korkeudella z yhtälöllä [13]

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{z}{z_0} \right)^k, \quad (1)$$

jossa k on laaduton vakiokerroin, arvoltaan yleisesti $k = \frac{1}{7}$ mutta se voi vaihdella välillä (0.141,0.414) riippuen ilmakehän stabiilisuudesta.

Savunouseman laskentaan on kehitetty korrelaatioita, jotka kertovat, millä tavalla savunouseman korkeus riippuu savupiipun rakenteesta, savukaasun ominaisuuksista ja säästä. Korrelaatiot perustuvat suureen määrään kokeellisia tuloksia useiden muuttujien hetkellisestä yhteisvaikutuksesta ja siihen, miten eri tekijät vertautuvat keskenään. Erot savukaasun ja tuulen nopeudessa ja lämpötilassa määräävät, miten korkealle savu voi nousta. Savu nousee yleensä sitä korkeammalle, mitä suurempi on kaasun nopeus tuulen nopeuteen nähden ja mitä lämpimämpiä savukaasut ovat ja mitä kylmempää ulkoilma on. On kuitenkin laskettu, että savunousema saavuttaa maksimikorkeutensa, kun savukaasun nopeus on 25 m/s. Siinä on eroja, miten savukaasun liikemäärä ja noste vaikuttavat korrelaatioissa. Monesti varsinainen liikemäärätermi puuttuu, mutta liikemäärä on huomioitu lämpöä kuvaavassa termissä.[20]

2.2.1 Briggsin korrelaatio

Tunnettu menetelmä savunouseman korkeuden Δh laskentaan on Briggsin korrelaatio [4][19]. Riippuen savukaasujen lämpötehosta ja mittausetäisyydestä samasta korrelaatiosta on olemassa eri versioita. Tässä työssä tarkastellaan voimalaitoksia, joiden savukaasun lämpöteho on alle 20 MW, jolloin Briggsin korrelaatio on [19]

$$\Delta h = \frac{1.6 F_b^{\frac{1}{3}} (3.5 x^*)^{\frac{2}{3}}}{u}, \quad (2)$$

jossa u on tuulen nopeus. Savukaasun lämpöominaisuuksia kuvaa parametri F_b [19]:

$$F_b = \frac{9.82 \Phi}{3.14 c_{ps} T_a \rho_s}, \quad (3)$$

jossa Φ on kattilateho, T_a ilman lämpötila, c_{ps} savukaasun ominaislämpö ja ρ_s savukaasun tiheys. Etäisyys x^* saadaan seuraavasti [19]:

$$x^* = 2.16 F_b^{0.4} h^{0.6}, \quad (4)$$

kun h on savupiipun korkeus. Tuulen nopeus piipun päässä voidaan ratkaista kaavalla (1).

2.2.2 Hollandin korrelaatio

Toinen yleisesti käytetty laskentateknikka on Hollandin korrelaatio [13][19]

$$\Delta h = \frac{v_s d}{u} \left[1.5 + 0.00268 p \left[\frac{T_s - T_a}{T_a} \right] d \right], \quad (5)$$

jossa d_s on piipun sisähalkaisija, v_s savukaasun nopeus piipussa, u tuulen nopeus, p ympäristön paine ja T_s savukaasun lämpötila.

2.2.3 Carson-Moses -korrelaatio

Kuten Briggs, Carson ja Moses ovat määrittäneet useita korrelaatioita ilmakehän eri stabiilisuusluokille. Näiden lisäksi he ovat kehittäneet kaikkiin olosuhteisiin sopivan yhtälön [20]

$$\Delta h = -0.029 \frac{v_s}{u} d + 5.35 \frac{Q_h^{\frac{1}{2}}}{u}. \quad (6)$$

Toisin kuin muissa korrelaatioissa, ensimmäisen termin edessä on miinusmerkki. Esimerkiksi tilanteessa, jossa savukaasujen lämpöteho Q_h on nolla, savu laskee. [20]

2.2.4 Erikoistapaukset

Päästölähteet voidaan jakaa lämpötilansa perusteella kuumiin, neutraaleihin ja kylmiin lähteisiin, joille on olemassa erikoistilanteen mukaiset savunousemayhtälöt [11]. Toisaalta savunousemia voidaan luokitella ilmakehän olosuhteiden perusteella. Savukaasun tuottama lämpövirta M laskeaan kaavalla [11]

$$M = c_p R' (T - T_a), \quad (7)$$

jossa R' on savukaasun standarditilainen tilavuusvirta ja T savukaasun lämpötila. Jos lämpövirta ylittää 6 MW, käytetään kaavaa [11]

$$\Delta h_{max} = 102 M^{0.600} u^{-1}. \quad (8)$$

Kun lämpövirta on välillä 1.4 MW – 6 MW, savunouseman korkeus lasketaan seuraavasti [11]:

$$\Delta h_{max} = 78.4 M^{0.750} u^{-1}. \quad (9)$$

Kylmille lähteille, joiden savukaasun lämpövirta on alle 1.4 MW, pätee yhtälö [11]

$$\Delta h_{cold} = u^{-1}(0.35vd + 84M^{0.500}). \quad (10)$$

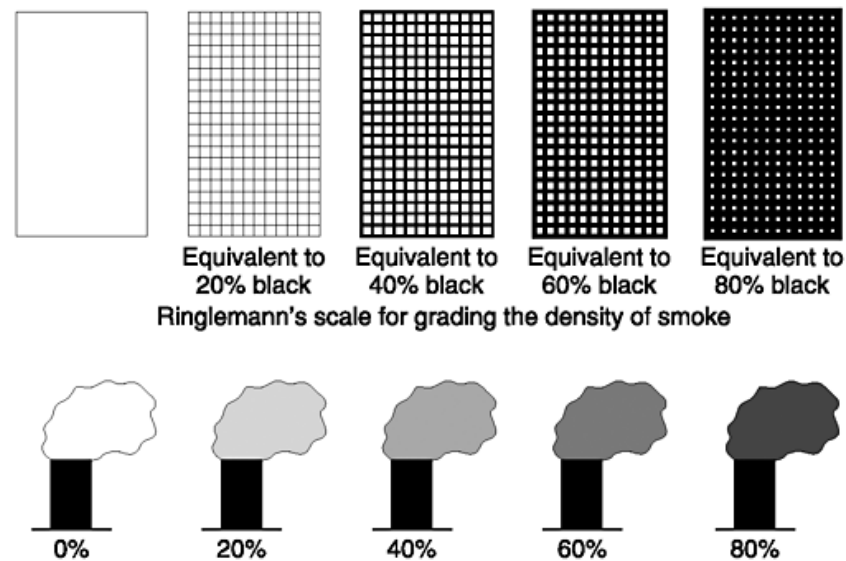
Erityisen puhtaille kaasuille käytetään yhtälöä [11]

$$\Delta h_{momentum} = 3.0vdu^{-1}, \quad (11)$$

jossa v on savukaasun nopeus ja d piipun halkaisija. Tätä kaavaa tulee käyttää myös tapauksissa, joissa saadaan suurempi tulos kuin kylmän savukaasulähteen yhtälöllä. [11]

2.2.5 Savukaasun kemiallinen koostumus

Savukaasun tarkasta koostumuksesta ei ole tietoa, joten on tyydyttävä teoreettiseen suuntaa antavaan arvioon. Savukaasun sameus voidaan määritellä vertaamalla sitä tilanteeseen, jossa savukaasu on täysin läpinäkymätöntä mustaa [14]. Kuvassa 3 on sameuden viisi eri tasoa, kuudes olisi 100 % musta [14].



Kuva 3. Savukaasun sameus.[14]

Epätäydellisestä palamisesta syntynyt savukaasu sisältää hiiltä kiinteinä hiukkasina, metaania ja hiilimonoksidia reaktioyhtälön (A) mukaisesti. Värillisen savun lisäksi osa savukaasusta on värittöntä. Osa polttoaineesta palaa täydellisesti suoraan hiilidioksidiksi ja vedeksi tai polttoprosessin tekniikasta riippuen lopputuotteisiin voidaan päätyä myös reaktioyhtälöiden (B) ja (C) osoittamalla tavalla. Oletetaan, että savukaasun tummuus riippuu pelkästään hiilen ja värittömien kaasujen suhteesta. Kuvan perusteella hakelämpölaitoksen piipun emittoima kaasu on sameudeltaan 40

%. Arvio on sen perusteella uskottava, että piipussa on matala lämpötila eikä palaminen todennäköisesti ole täydellistä [14]. Väritöntä kaasua on siis 60 %, joista happea on 7 %, hiilidioksidia 12 % [14] ja loput metaania, hiilimonoksidia ja typpeä. Koska jäljelle jääneiden komponenttien osuutta värittömässä savukaasussa ei tiedetä, arvioidaan veden, metaanin ja hiilimonoksidin osuudeksi 10 % ja typen 11%. Näin ollen savukaasun moolimassa on 20,0078 g/mol. Tyypillinen ilman koostumus puolestaan on 78 % typpeä, 21 % happea ja 1 % argonia [26] ja muita kaasuja. Ilman moolimassa on tällöin 28,9595 g/mol .

Savukaasun moolivirta \dot{N} voidaan laskea yhtälöstä

$$p\dot{V} = \dot{N}R_uT, \quad (12)$$

jossa \dot{V} on tilavuusvirta ja T savukaasun lämpötila. Piipusta poistuvan savukaasun lämpöteho on

$$Q_h = \dot{N}H, \quad (13)$$

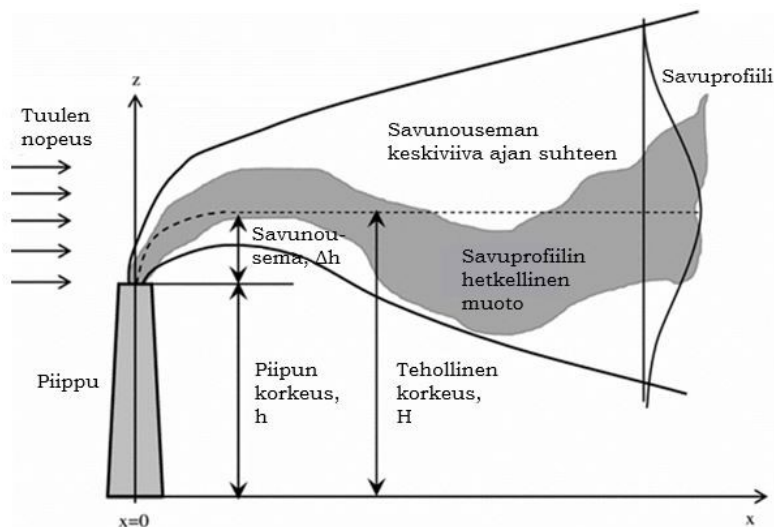
kun H on kuivan ilman entalpia halutussa savukaasun lämpötilassa.

3. ILMANSAASTEIDEN LEVIÄMISMALLIT

Ilmansaasteiden leviämismalli on approksimaatio, jolla pyritään arvioimaan hiukkaspäästöjen leviämistä pistelähteistä ympäristöön. Sillä, kuinka hyvin saasteiden leviämistä voidaan ennustaa, on merkitystä kaupunkisuunnittelun ja voimalaitosten rakentamismahdollisuuksien kannalta [10]. On olemassa viisi erilaista leviämismallia: laatikko-, gauss-, euler-, lagrange- ja virtaustyyppinen leviämismalli. Riippuu maaston pinnanmuodoista, mitä mallia on järkevää käyttää.

3.1 Gaussin dispersiomalli

Gaussin malli on luotu alunperin savukaasun liikeyhtälöistä. Hiukkaskonsentraatiot noudattavat normaalijakaumaa, kun ne mitataan tuulen suunnassa etäisyyden funktiona. Ehtona on, että ympäristön ilmvirta on jatkuva ja savun liike on tasaista ja yhtenäistä. Päästölähteen on oltava pistemäinen ja selvästi korkeammalla kuin ympäristö.[17]



Kuva 4. Gaussin malli. Hiukkaskonsentraatiot noudattavat normaalijakaumaa. Muokattu lähteestä [6].

Gaussin malli on usein käyttökelpoinen kaupunkiympäristöissä tai pienissä rajatuissa ympäristöissä [11]. Hiukkasten translaatio ja diffuusio ovat hyvin ennustettavissa, joten malli on yksinkertaisuutensa ansiosta erityisen käyttökelpoinen pistemäisille päästölähteille. Kun tuulen nopeus on vakio, hiukkaspitoisuutta kuvaavan osittaisdifferentiaaliyhtälön ratkaisu on normaalijakaumaa noudattava konsentraatiofunktio C . Se ilmaisee hiukkasten massan tilavuuden suhteen seuraavasti [15]:

$$C(x, y, z_r, H_e) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2} \left\{ e^{-\frac{(z_r - H_e)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z_r + H_e)^2}{2\sigma_z^2}} \right\}, \quad (14)$$

jossa z_r on savunouseman etäisyys maanpinnasta, H_e piipun tehollinen korkeus, joka on [24]

$$H_e = h_s + \delta h, \quad (15)$$

kun h_s on savupiipun korkeus ja δh savunouseman korkeus. Symboli u on tuulen nopeuden x -komponentti tehollisella korkeudella, x alaspvirtauksen etäisyys lähteestä mittapisteeseen, y lateraalinen etäisyys lähteestä mittapisteeseen, σ_y dispersiokerroin vaakasuorassa suunnassa ja σ_z pystysuoran suunnan dispersiokerroin.[15] Gaussin mallilla voi laskea hiukkasten konsentraation, joka joko absorboituu maanpintaan yhtälöllä [24]

$$c_j = \frac{\dot{m}_{j,s}}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} e^{\left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}}, \quad (16)$$

jossa σ_y ja σ_z ovat vaakasuoran ja pystysuoran suunnan dispersiokertoimia [24]:

$$\sigma_y = ax^b \quad (17)$$

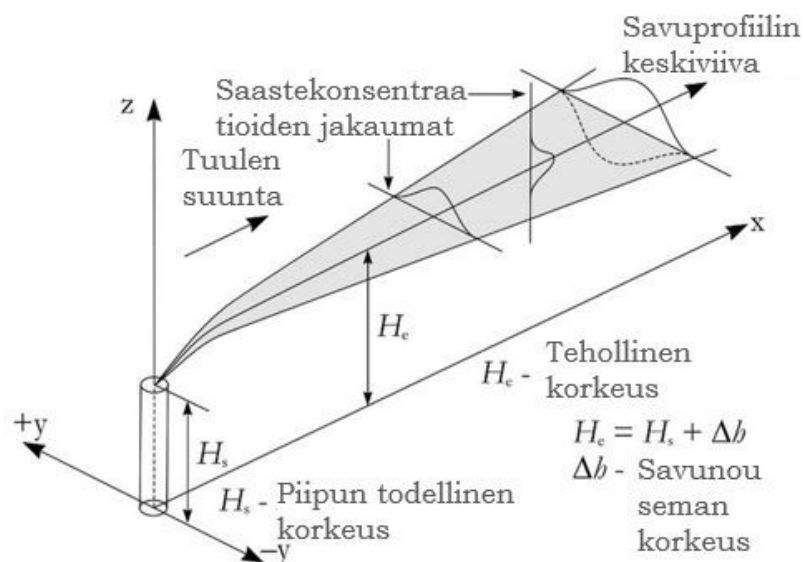
ja

$$\sigma_z = cx^d + f, \quad (18)$$

kun a, b, c, d ja f ovat sääolosuhteisiin liittyviä parametreja.

Maanpinnasta heijastuva hiukkaskonsentraatio lasketaan yhtälöllä [24]

$$c_j = \frac{\dot{m}_{j,s}}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \left[e^{\left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}} + e^{\left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}} \right]. \quad (19)$$



Kuva 5. Gaussin dispersiomalli. Savupiipun yläpuolella oleva vaakasuora akseli osoittaa savukaasun keskimääräisen kulkureitin. Muokattu lähteestä [23].

Vaikka käytettäisiin samaa Gaussin mallia yksittäiselle tapaukselle, hiukkaskonsentraatiot mieltäisellä etäisyydellä x voivat vaihdella huomattavan paljon. Erilämpöisillä pistelähteillä erot konsentraatioarvoissa johtuvat osaltaan lämpötilan aiheuttamasta ilman kerrostumisesta. Ilman jakautumisella kerroksiin lämpötilan mukaan on suora vaikutus savunouseman korkeuteen ja muotoon, mikä puolestaan vaikuttaa savukaasujen leviämismallin toimivuuteen.[11]

3.2 Sovelletut dispersiomallit

Gaussin mallista alkunsa saanut yleinen ilmansaasteiden leviämismalli, *General plume dispersion model (GPDM)* kuvaa savunouseman hiukkaspitoisuuden tuulen suunnassa valitulla etäisyydellä piipusta. Gaussilaisen mallin tapaan tässä leviämismallissa käytetään Briggsin ja Hollandin korrelaatioita. Savukaasu, joka on kevyempää kuin ympäröivä ilma, suuntautuu nosteen vuoksi piipusta ylöspäin.[15] Ympäröivän ilman voi savukaasun turbulentiin virtaukseen nähden olettaa stabiiliksi, vaikka ilmassa tapahtuu paljon satunnaisia virtauksia. Tilanteesta riippuen savukaasu joko ei läpäise ollenkaan vakaata ilmakerrosta tai tunkeutuu kerrokseen osittain tai kokonaan [15]. Eulerin dispersiomallissa savunousemalaskujen lähtökohtana on massan, energian ja liikemäärän säilymislaite [7].

Toisaalta ilmansaasteiden leviämismallit luokitellaan kolmeen ryhmään, joita ovat seulonta-, hienorakenne- ja erikoistunut leviämismalli. Seulontamallissa alkutietoina ovat käyttäjän itse asettamat ehdot tai vaihtoehtoisesti meteorologiset ehdot. Malli on melko rajoittunut, koska se toimii vain tietylle määrälle pistelähteitä. Hienorakennemalli on monipuolisempi: siinä säätietoja käytetään tunnin tarkkuudella. Eri lähdetyypeille ei ole rajoituksia eikä pistelähteiden määrälle ylärajaa. Erikoistuneet mallit puolestaan toimivat vain tarkoin määritellyssä tilanteessa, jossa tietyt tunnetut ominaisuudet täyttävät kaikki mallin vaatimat reunaehdot.[10]

Kemiallisia liikemalleja CTM eli "Chemical Transport Models" käytetään yhdyskuntien päästöjen tarkasteluun ja hallintaan. Mallit perustuvat vertikaalisiin emissioprofiileihin. Nämä ovat hyviä tarkoituksiin, joissa ajallinen ja avaruudellinen vaihtelevuus on suurta. Mallit osoittavat myös selkeästi erot savunouseman korkeudessa riippuen siitä, onko kohde rannikolla vai mantereella.[13]

Pregger et al. tutki eri savukaasun leviämismallien toimivuutta suhteessa reaali maailman dataan ja tuloksena oli hyvin erilaisia arvioita hiukkaskonsentraatiosta riippuen laitoksen iästä ja funktionaalisista prosesseista. Esimerkiksi vertikaalinen jakauma aliarvioi perustason konsentraatiot, kun taas De Meijn et al. jakauma yliarvioi ne. Vaikka tärkeät parametrit ja dispersiomalli ylipäättään olisivat erittäin tarkkoja, se ei vielä riitä tuottamaan todellista ympäristöä vastaavia tuloksia. Valmiita leviämismalleja on siis tärkeä kehittää erityisesti tosielämän dataan perustuvien kokeellisten menetelmien kautta.[11]

Tohidin ja Kayen vuonna 2016 tekemä tutkimus osoittaa, että pienillä nopeuksilla tuulen nopeusprofiilin muoto on merkittävä tekijä ilmansaasteiden konsentraation määrittämisessä, koska ilmakehän turbulentit virtaukset muuttavat savunouseman ominaisuuksia. Ilmakehän stabiilisuusehdot määräytyvät monista tekijöistä.[2][7] Esimerkiksi ristikkäisvirtauksessa on havaittu toistuvasti turbulentin savuvirtauksen kiertävän vastapäivään, kun tuuli on vaakasuuntainen ja savuprofiiliin nähden kohtisuorassa. Kaasujen sekoittumista voidaan ennustaa, kun sääolosuhteet tunnetaan.[12] Vuonna 2015 Decrop et al. selvittivät kaksifaasisen savukaasun ominaisuudet liikemäärän ja nosteen suhteen. Käyttämällä vertailukohtana numeerisia tuloksia he kehittivät myös korjauskertoimia perinteisille integraalimalleille.[2] Yleisesti ympäristön stabiilisuusehtoihin kuuluu, että ilmavirtaukset ovat laminaareja ja liike oletetaan tasaiseksi eli tuulen vaakasuorat kiihtyvyydet ovat nollija sekä ympäristö on matalassa lämpötilassa. Ilman ja savukaasun tiheysero jätetään usein huomiotta lukuunottamatta tilannetta, jossa nosteen merkitys on hallitseva.[21]

3.3 Virtaustyyppiset dispersiomallit

Jos vaaditut stabiilisuusehdot eivät toteudu, savunouseman käyttäytymistä ei voi enää arvioida yksinkertaistetuilla malleilla [21] vaan tarvitaan virtaustyyppistä mallia. Gaussin stationääri malli on toimiva, kun arvioidaan avaruudellisia hiukkaspitoisuuksia. Se ei kuitenkaan ota huomioon sekundäärisiä ilmansaasteita, kun taas transientti Lagrangen malli huomioi hiukkasten diffuusion ja muuntumisen mutta sen tarkkuus rajoittuu usein määrättyihin meteorologisiin reunaehtoihin. Vaikka kemialliset liikemallit (CTM) pystyvät hyödyntämään lähtötietoinaan fysikaalista ja kemiallista tietoa, ne usein aliarvioivat hiukkaskonsentraatiot lähellä päästölähdettä. Entistä paremmat dispersiomallit olivat siis tarpeen.[5]

Numeerisia menetelmiä on kehitetty tuulitunnelikokeiden avulla, mutta ne eivät välttämättä vertaudu todellisuuteen. Esimerkiksi turbulentti dispersio on erittäin vaikea määrittää, koska ympäristössä on rakennuksia ja niiden pinnalla on ilman rajakerros. Savukaasuhiukkasiin vaikuttavat arvaamattomasti myös ylös tai alas suuntautuvat nostevoimat.[3] Dispersion määrittäminen numeerisesti tarkoittaa tietokoneella tapahtuvaa CFD-laskentaa (computational fluid dynamics) [8], jossa käsitellään suurta määrää dataa. Neutraalille tai epästabiilille ilmakehälle on olemassa erilaisia tasapainoehtoja. CFD-simulaatiossa ratkaistaan konsentraatio liikeyhtälöstä, joka perustuu Navier-Stokes -yhtälöihin.

Hiukkasten liike on usein turbulenttista etenemistä ja sekoittumista [8]. RANS-LES eli "Reynolds averaged Navier-Stokes and large eddy simulation" on eräs tekniikka dispersion mallintamiseen [2]. Tiedetään, että kaasu voi käyttäytyä kolmella eri tavalla riippuen sen tiheydestä verrattuna ympäristön ilman tiheyteen: se voi olla kevyttä, neutraalia tai raskasta [8]. RANS-LES toimii parhaiten neutraalille kaasulle, kun taas kevyelle kaasulle se soveltuu huonosti.[2][8] On vaikeaa sisällyttää paljon erilaisia savukaasun leviämisen vaiheita yhteen malliin –ominaisuudet, kuten

ilman kerrostuminen, noste ja kemiallinen koostumus [8] vaativat keskenään erilaisia tarkastelutapoja. CFD-menetelmää on viime vuosina käytetty kaupunkiympäristössä pienellä päästölähdettä ympäröivällä alueella. Kun valitaan sopiva numeerinen menetelmä ja tilannetta vastaavat reunaehdot ja huomioidaan epätarkkuus, CFD-malli on tulevaisuudessa oikein kehityskelpoinen.[8]

Tähän mennessä on tarkasteltu ainoastaan savukaasun fysikaalisia ominaisuuksia, vaikka korkeissa lämpötiloissa useat aineet ovat hyvin reaktiivisia. CFD-laskenta soveltuu myös reaktiivisille savukaasuvirtauksille. CFD-malliin perustuu viisi käyttökelpoista numeerista menetelmää, joista kaksi ensimmäistä ovat "jet-dominated region" (JDR) ja "ambient-dominated region" (ADR). ADR edellyttää tietoja pistelähteen eli savupiipun ominaisuuksista. Menetelmissä on eroja sen suhteen, mitä pidetään määrittelypisteenä. Parhaat tulokset tuottavat "Reynolds averaged Navier-Stokes with velocity inlet", RANS-VI ja RANS-LES, joista VI:llä on ylivoimaisesti suurin tarkkuus. LES taas on parempi vaihtoehto voimalaitosten käyttöön kuin JDR, mutta käyttökustannukset ovat LES:llä huomattavasti suuremmat. Usein LES:n tarkkuus on riittävä käytännön mittauksiin; VI on niin kallis, ettei lisätarkkuudesta ole merkittävää hyötyä. RANS-VS eli "Reynolds averaged Navier-Stokes with volume source" puolestaan vaatii toimiakseen jalostetun mittausalueen kattavan verkon. Jotta laskentaprosessista olisi ylipäättään mitään hyötyä, valittaessa sopivaa turbulenssimallia on erityisen tärkeää kiinnittää huomiota alueen verkon herkkyyteen ja piipun ominaispiirteisiin.[5]

4. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä kappaleessa tarkastellaan kolmen tunnetun korrelaation toimivuutta Hervannassa sijaitsevien hakelämpölaitoksen ja öljylämpökeskuksen tapauksissa. Vertailuarvona käytetään kuvasta mitattua savunouseman korkeutta. Kuvat ovat aikakeskiarvoja, joissa referenssimittana tunnetaan piipun halkaisija. Kuvapisteen avulla määritetään savunouseman etäisyys piipun suuaukosta.

Laitos	Hakelämpölaitos	Öljylämpökeskus
Päiväys	12.2.2019 klo 12.00	22.02.2019 klo 9.00
Piipun korkeus (m)	75	50
Piipun halkaisija (m)	2,8	1,2
piipun ala (m ²)	6,16	1,13
Nopeus piipussa (m/s)	4,38	4,42
Savukaasun lämpötila (°C)	45	130
Savukaasun lämpötila (K)	318,15	403,15
Tilavuusvirta (m ³ /s)	27	5
Teho (MW)	44	15
Ympäristön lämpötila (°C)	-3,2	-13,3
Ympäristön lämpötila (K)	269,95	259,85
Tuulen nopeus (m/s)	5,4	0
Tuulen suunta (°)	307	0
Suhteellinen kosteus (%)	81	87
Paine (kPa)	100,64	104,16

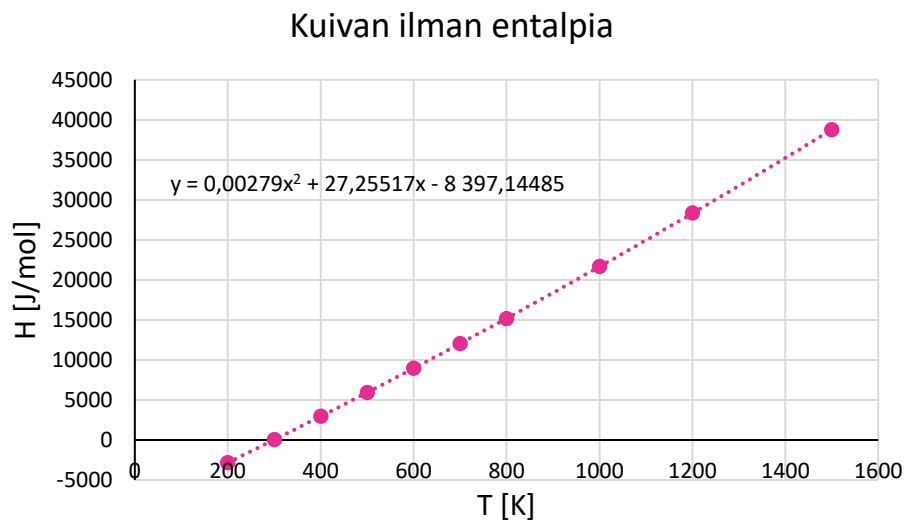
Taulukko 1. Laitosten ja ympäristön ominaisuudet.[27][28]

Taulukossa 2 on laskettu arvio orgaanisen savukaasun tiheydestä kaasukomponenttien tiheyksien avulla. Jos oletetaan, että savukaasu sisältää vettä, hiilimonoksidia ja metaania 10 %, hiilidioksidia 12 %, typpeä 11% ja happea 7 %, savukaasun tiheys olisi $1,65808 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, mikä ei kelpaa. Savukaasu on kevyempää kuin ilma. Hiilestä koostuva osuus ei kuitenkaan ole kokonaisuudessaan kiinteää hiiltä vaan pääasiassa ilmaa, jossa on kevyitä hiukkasia. Muokataan tulosta korvaamalla hiilen tiheys normaalin ilman tiheydellä. Tällöin savukaasun tiheydeksi saadaan $1,26128 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Vaikka tarkasteltavat voimalaitokset ovat polttoaineiltaan erilaisia, savukaasun tiheydessä ei todennäköisesti ole merkittäviä eroja. Laskukaavat eivät huomioi kaasujen kemiallista koostumusta, joten tässä tarkastelussa vain tiheydellä on merkitystä. Yksinkertaisuuden vuoksi käytetään samaa tiheyden arvoa molemmissa tapauksissa. Otetaan aineiden ominaisuudet lämpötilassa 0 °C. Ilman ominaislämpö on 1,006 kJ/kg°C [29].

Aine	Tiheys
H ₂ O	0,8035
CO	1,25
CO ₂	1,97
N ₂	1,25
O ₂	1,429
C	2,267
H ₂	0,089
CH ₄	0,72
ilma	1,275
savukaasu	1,26128

Taulukko 2. Kaasujen tiheydet yksikössä g/cm³. [25][25][29]

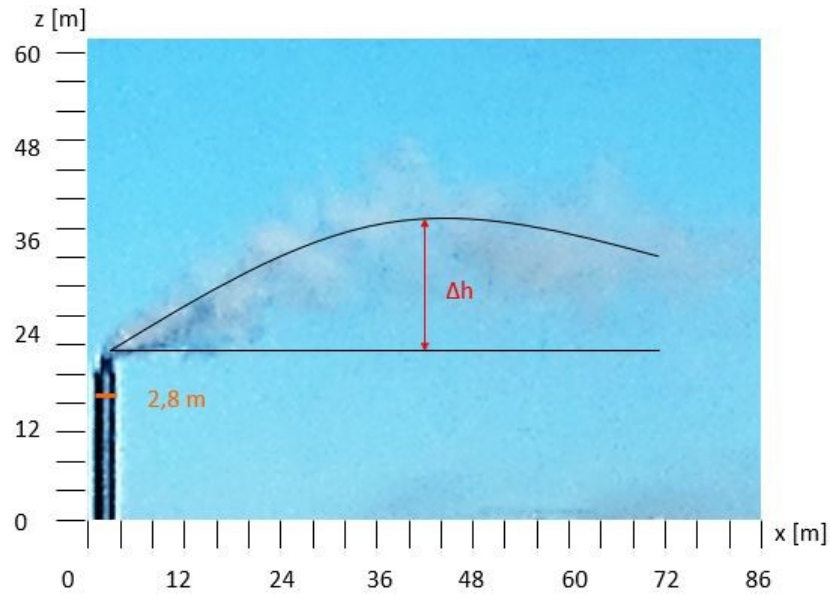
Korrelaatioita varten tarvitaan tietoa savukaasun entalpiasta. Savukaasulle ei tunneta entalpiaa mutta tarpeeksi tarkka arvio saadaan kuivan ilman taulukkoarvoista. Kun tiedetään savukaasun lämpötilat hakelämpölaitoksen ja öljylämpökeskuksen tapauksissa, voidaan entalpia lukea suoraan kuvasta 6.



Kuva 6. Kuivan ilman entalpia lämpötilan funktiona.

4.1 Hervannan hakelämpölaitoksen piippu

Itä-Hervantaan, lähelle Ruskon teollisuusalueetta, valmistui vuonna 2015 terminen voimalaitos, joka toimii puuperäisillä polttoaineilla.

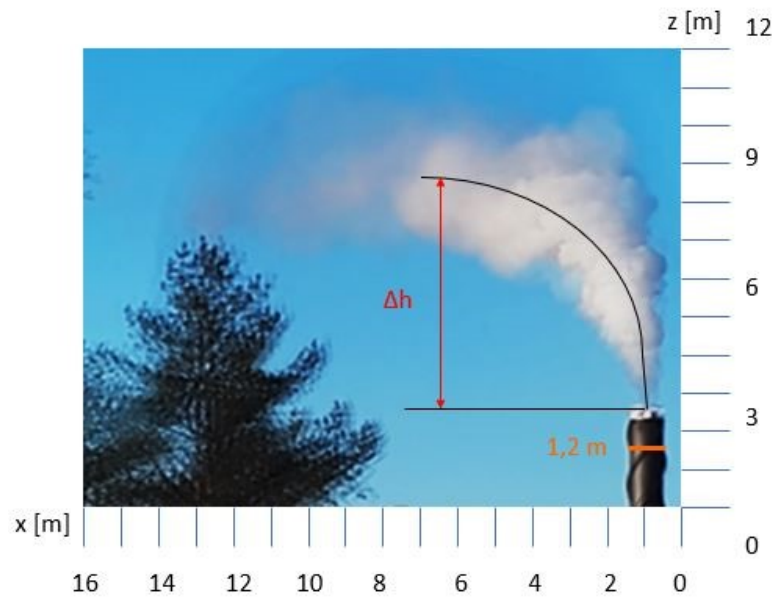


Kuva 7. Hervannan hakelämpölaitoksen piippu.

Hervannan hakelämpölaitoksen piipun korkeus on 75 m ja halkaisija 2,8 m. Kuvaushetkellä kattilateho oli 44 MW, poistuvan savukaasun lämpötila 45 °C ja tilavuusvirta 27 m³/s [28]. Kuvaushetkellä 12.2.2019 klo 12.00 ympäristön lämpötila oli -3,2 °C, ilmankosteus 81 %, paine 1006,4 hPa ja tuulen nopeus 5,4 m/s luoteesta °C [28]. Kuva 7 koostuu 35 peräkkäisestä otoksesta 0,5-2 sekunnin välein.

4.2 Hervannan öljylämpökeskuksen piippu

Öljylämpökeskus on Hervannan keskustassa paloaseman viereisellä tontilla. Laitoksen käyttämälle kevyelle polttoöljylle lämpöarvo on 43 MJ/kg.[25] Öljylämpökeskuksessa on kolme kattilaa, joista jokaiselle on oma horminsa.



Kuva 8. Hervannan öljylämpökeskuksen piippu.

Kuvaushetkellä 22.2.2019 klo 9.00 käytössä oli vain kattila 3 teholla 15 MW. Piipun korkeus on 50 m ja sisähalkaisija 1,2 m. Savukaasun tilavuusvirta kuivana NTP-olosuhteissa oli 5 m/s. Savukaasun kosteus oli 9 til-% ja lämpötila 130 °C. Ympäristön lämpötila oli -13,3 °C, tuulen nopeus 0 m/s, ilmanpaine 1041,6 hPa ja suhteellinen kosteus 87 %.[28] Kuva 8 on aikakeskiarvo kuu-desta päällekkäin olevasta kuvasta, jotka on otettu noin 15 sekunnin välein.

Hiukkaskonsentraatio määritetään vaakasuuntaisen etäisyyden x funktiona kahdessa eri tapauksessa: saasteita heijastuu maanpinnasta tai heijastumista ei tapahdu ja saasteet imeytyvät maanpintaan. Konsentraatio c_j lasketaan yhtälöillä (16) ja (19). Alussa se on nolla, keskellä suurin ja lopussa taas nolla. Konsentraatio riippuu tuulen nopeudesta, toisesta vaakaeetäisyydestä y ja pystysuorasta etäisyydestä z suhteessa piipun teholliseen korkeuteen H . Lisäksi vaikuttavat y - ja z -suuntaiset dispersiokertoimet σ , jotka saadaan yhtälöistä (17) ja (18). Dispersiokertoimien arvot riippuvat parametreista a, b, c, d ja f . Parametrit puolestaan saadaan taulukosta [24], kun tiedetään tuulen nopeus, suuntaa antava säteilyn voimakkuus ja vuorokaudenaika. Yhtälöissä (16) ja (19) y -suuntainen etäisyys oli 1 m ja korkeus z kävi 100 metristä 2,5 metriin. Hakelämpölaitoksen tehollinen korkeus H on 101 m. Kun $z = H$, eksponentti yhtälössä (16) menee nolllaksi ja tilanteessa, jossa heijastumaa ei ole, konsentraatio ilmassa on tällöin suurin mahdollinen. Kun saasteiden heijastumista tapahtuu, hiukkaskonsentraatio on vieläkin suurempi, koska yhtälön (19) ensimmäinen eksponentti menee nolllaksi edellisen tapaan ja toinen saa tällöin maksimiavonsa. Vastaavasti, jos $z < H$ tai $z > H$, konsentraatiot pienenevät. Kuvaajan pitäisi muistuttaa gaussin kellokäyrää.

5. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Taulukossa 3 on jaettu savupiipun todellinen halkaisija piipun halkaisijalla kuvapisteinä ja kerrottu savunouseman korkeudella kuvapisteinä. Saatu arvo on vertailukorkeus. Taulukossa on myös savupiipusta emittoituva lämpövirta laskettuna kaavalla (7) ja Briggsin korrelaatiossa (2) tarvittavat parametrit kaavoilla (3) ja (4). Alimpana on kokeiltu erikoistapauksien savunousemakaavoja (8-11). Kuvattaessa öljylämpökeskusta oli Ilmatieteen laitoksen mukaan tyyntä [27]. Koska savu-profiili kääntyy tiettyyn suuntaan, tuuli ei kuitenkaan ole voinut olla 0 m/s,. Taulukon 3 laskuissa käytettiin öljylämpökeskuksen kohdalla tuulen nopeuden arvoa 0,50 m/s,. Savunousemakaavoista puhtaan kaasun savunouseman kaava (11) näyttää toimivan hyvin molemmille piipuille ja yli 6 MW lämpövirtaa emittoivan lähteen kaava (8) antaa myös melko hyvän tuloksen öljylämpökeskuksen tapauksessa.

Laitos	Hakelämpölaitos	Öljylämpökeskus
Piipun halkaisija (kuvapiste)	27	48
Savunouseman korkeus (kuvapiste)	252	427
Savunouseman vertailukorkeus (m)	26,13	10,68
Savukaasun ominaislämpö (kJ/kg°C)	0,027	0,017
Lämpövirta (MW)	0,035	0,012
Parametri Fb	15,08	8,62
x*	85,27	53,47
Puhtaan kaasun savunousema (m)	20,22	14,40
Lämpövirta alle 1,4 MW (m)	2,90	24,99
Lämpövirta 1,4 MW-6 MW (m)	1,17	5,62
Lämpövirta yli 6 MW (m)	2,51	14,23

Taulukko 3. Savukaasunouseman vertailukorkeudet on laskettu aikakeskiarvokuvista. Lisäksi keuhkehtiin erikoistapausten savunousemakaavoja.

5.1 Korrelaatioiden tulokset

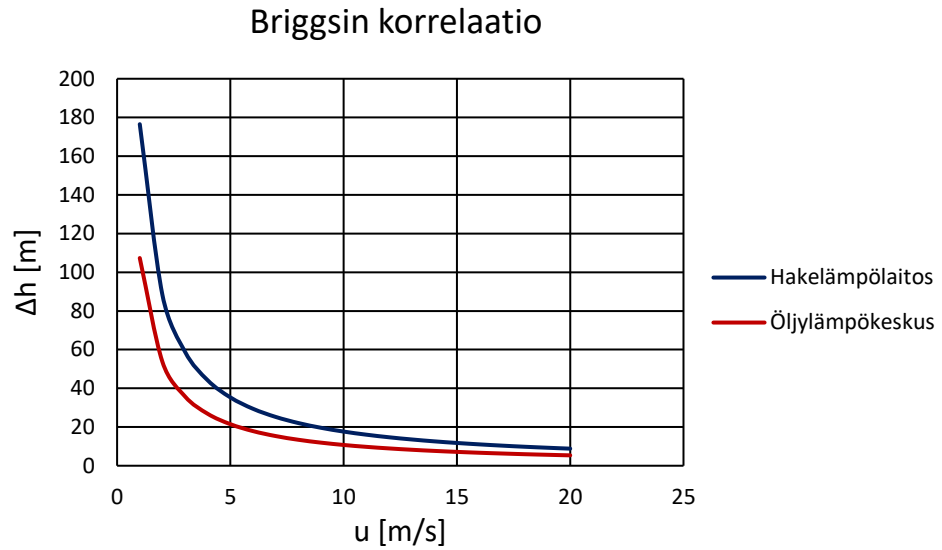
Hakelämpölaitosta kuvattaessa tuulen nopeus oli 5,4 m/s, lähellä maanpintaa. Kaavalla (1) laskettu tuulen nopeus piipun korkeudella oli noin 12 m. Tuulen nopeus korkealla vaikuttaa liian suurelta siihen nähden, mitä se on ollut Ilmatieteen laitoksen havaintoasemalla. Toisaalta havaintopisteen korkeutta ei tiedetä. Kaavassa (1) sen oletettiin olevan 10 m. Sitä paitsi kohteista lähimmille havaintoasemille, Tampellaan ja Härmälään, on kilometrejä matkaa ja maastossa on korkeuseroja. Tuulen nopeus on siis saattanut olla vain luokkaa 5 m/s. Öljylämpökeskuksen kuvaus-hetkellä tuulen nopeus oli joka tapauksessa pieni.

Koska tuulen nopeuteen liittyy huomattavasti epävarmuutta, savunouseman korkeus määritettiin tuulen nopeuden funktiona. Kuvaajista nähdään, että savunouseman korkeus on suurin pienillä tuulen nopeuksilla. Tuulen nopeus on epätarkka, joten korrelaatioita ei voi arvioida sen avulla. Sen sijaan on parempi pitää korkeutta luotettavana tietona ja tarkastella, onko kyseinen tuulen nopeus uskottava kussakin tilanteessa. Hakelämpölaitoksen piipun savunousemalle vertailukorkeus oli 26,13 m ja öljylämpökeskukselle 10,68 m. Vaikuttaa todenmukaiselta, että öljylämpökeskuksen tapauksessa oli lähes tyyntä ja hakelämpölaitoksen kohdalla nopeus oli noin 5 m/s.

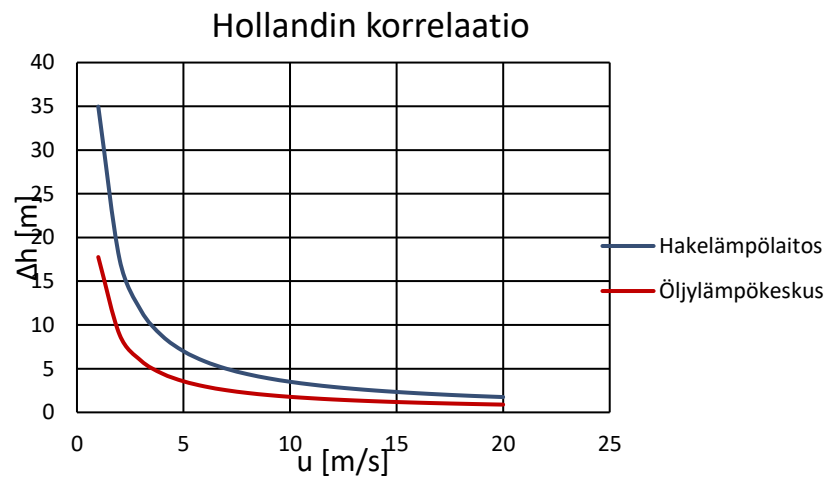
Edellisen perusteella Carson-Moses -korrelaatio (6) näyttää 5 m/s kohdalla olevan välillä 25—30 m, mikä on juuri oikea korkeus hakelämpölaitoksen piipun savunousemalle. Briggsin korrelaatiolla korkeus on yli 30 m eli liian suuri ja Hollandin korrelaatiolla (5) liian pieni, noin 7,5 m. Öljylämpökeskuksen piipun savunousemalle näyttää tässä tapauksessa toimivan vain Hollandin korrelaatio. Tuulen nopeus kohdassa 11 m on 0,25 m/s.

Toisaalta hakelämpölaitoksen tapauksessa vertailukorkeudella tuulen nopeus olisi Briggsin korrelaatiolla 6,5 m/s, Hollandin korrelaatiolla 0,20 m/s ja Carson-Moses -korrelaatiolla 5,0 m/s. Öljylämpökeskukselle taas tuulen nopeudet vertailukorkeuden suhteen olisivat Briggsin korrelaatiolla 10 m/s, Hollandin korrelaatiolla 0,25 m/s ja Carson-Moses -korrelaatiolla 12,5 m/s. Tässä tapauksessa toimi ainoastaan Hollandin korrelaatio.

Näiden yksittäistapausten perusteella voisi tarkempaa tutkimusta ajatellen olettaa alustavasti, että Briggsin ja Carson-Moses -korrelaatiot toimivat hyvin ainakin pienillä tuulen nopeuksilla ja Hollandin korrelaatio lähes tyyneellä säällä. Tosin virhelähteet vaikuttavat todennäköisesti huomattavasti tulokseen. Ensinnäkin laitosten itse tekemät mittaukset savukaasun ominaisuuksille on ilmoitettu pienellä tarkkuudella ilman virherajoja. Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat ovat kaukana varsinaisesta kohteesta ja niissäkin tarkkuus on vähäinen. Vertailukorkeuden määrittäminen kuvapisteiden avulla on epätarkka, sillä pikselit olivat kokonaislukuina ja valokuvan aikakeskiarvo ei ollut piipun kohdalta niin selvärajainen, ettei tulkinnanvaraa olisi jäänyt. Tulokset ovat silti oikean suuntaisia: savunouseman korkeus pienenee eksponentiaalisesti tuulen nopeuden kasvaessa.



Kuva 9. Hakelämpölaitoksen ja öljylämpökeskuksen piippujen savunouseman korkeus Briggsin korrelaatiolla [19] tuulen nopeuden funktiona.



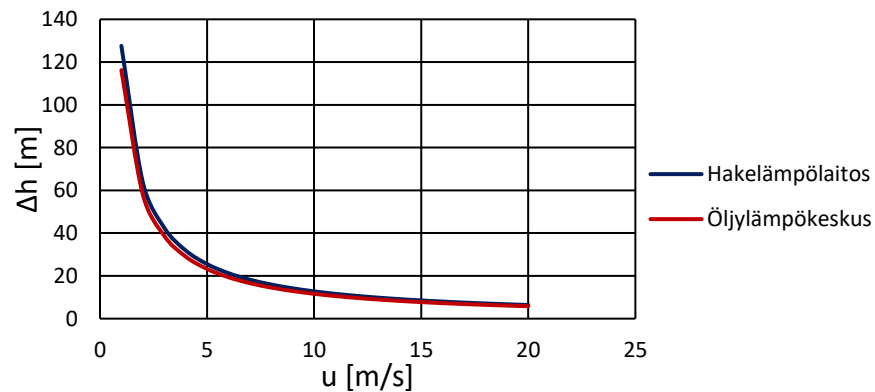
Kuva 10. Savunouseman korkeus Hollandin korrelaatiolla [19] tuulen nopeuden funktiona.

Savukaasun moolivirta saadaan kaavasta (12), kun tilavuusvirta ja lämpötila tunnetaan. Ilman entalpia saadaan kuvasta 6, kun tiedetään ympäristön lämpötila piippujen kuvaushetkellä. Kaavan (13) mukaan hakelämpölaitoksen savukaasujen lämpöteho Q_h on 0,572 MW ja öljylämpökeskuksen 0,473 MW. Näiden tietojen avulla voidaan laskea savunouseman korkeus Carson-Moses-korrelaatiolla.

Suure	Arvo	Yksikkö
p	100640	Pa
Ru	8,314	J/molK
N hake	1027,29	mol/s
N öljy	155,38	mol/s
H hake	556,49	J/mol
H öljy	3044,24	J/mol
Qh hake	0,572	MW
Qh öljy	0,473	MW
1 megawatt=	0,0167	MJ/kg
Q hake	9,5	MJ/kg
Q öljy	43,2	MJ/kg
tiheys hake	0,83	t/m ³
tiheys öljy	0,38	t/m ³
m hake	137,99	t/s
m öljy	2,15	t/s

Taulukko 4. Lähtötietoja savukaasun lämpötehon ja entalpian laskemiseen.[30]

Carson-Moses -korrelaatio

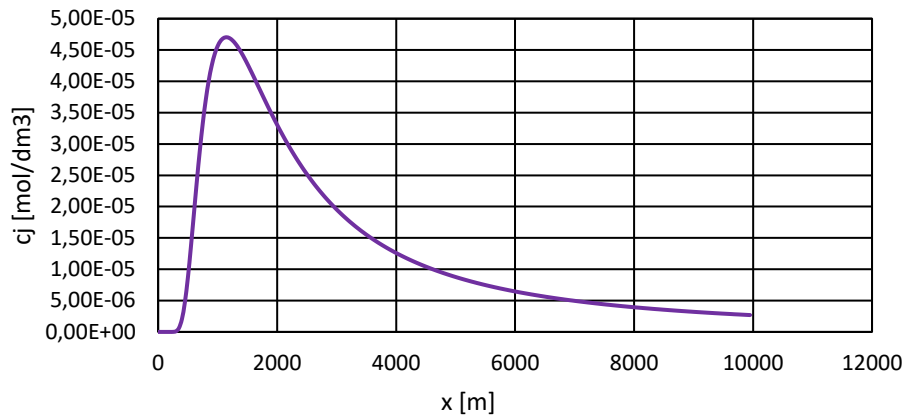


Kuva 11. Savunouseman korkeus tuulen nopeuden funktiona Carson-Moses -korrelaatiolla [20].

5.2 Hiukkaskonsentraatiot Gaussin mallin mukaan

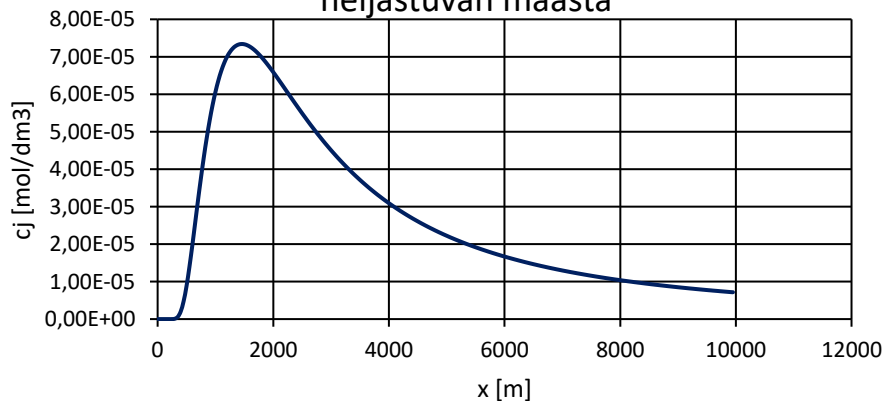
Gaussin malliin kuuluvia yhtälöitä (14-19) käyttämällä määritettiin hakelämpölaitoksen emissio vaakasuoran etäisyyden x funktiona maanpinnan tasolla, savuprofiilin keskellä, kun $z = 0$ ja $y = 0$. Tuulen nopeudeksi oletettiin 5 m/s.

Konsentraatio kun oletetaan laskeuman absorboituvan maahan



Kuva 12. Hiukkaskonsentraatio vaakaetäisyyden funktiona ilman heijastumaa.[24]

Konsentraatio kun oletetaan laskeuman heijastuvan maasta



Kuva 13. Hiukkaskonsentraatio vaakaetäisyyden funktiona, kun saasteet heijastuvat maanpinnasta.[25]

Maksimikonsentraatio on $4,65 \cdot 10^{-5} \text{ mol/dm}^3$ kuvassa 12, jossa hiukkaset absorboituvat maanpintaan. Kuten voisi olettaa, hiukkasten heijastuessa maanpinnasta takaisin ilmaan kuvassa 13, konsentraatio on suurempi: $7,33 \cdot 10^{-5} \text{ mol/dm}^3$. Päästöjä tulisi siis ilmaan hieman vähemmän, jos kaikki hiukkaset absorboituisivat maahan. Ilmiö riippuu hiukkasten ominaisuuksia paljon enemmän maaperästä. Asfaltoiduilla kaduilla heijastumista on vaikea estää, kun taas kostea, lehtotyyppinen metsä todennäköisesti imee tehokkaasti saasteita. Saasteiden absorboitumista voisi kokeilla esimerkiksi pesusienien tavoin toimivilla materiaaleilla tai erityisellä tahmealla pinnalla. Toisaalta erot konsentraatioissa ovat niin pieniä, että kestävä, käytännöllistä ja kustannustehokasta ratkaisua voi olla vaikea löytää. Lisäksi absorboiva pinta jouduttaisiin asentamaan laajalle alueelle ja melko pitkälle päästölähteestä.

Tilanne riippuu paljon säästä, mutta asuinalueet täytyy rakentaa riittävän kauas päästölähteestä. Kuivissa etäisyydellä 0-3 m saastekonsentraatio on olematon, mutta asiasta ei varsinaisesti ole hyötyä, koska niin lähelle ei voi rakentaa. Teollistuneissa maissa suurimmat kaupungit ovat liikenteen pienhiukkaspäästöjen vuoksi ilmanlaadultaan epäterveellisiä asua, sillä ihmisen hengitysteiden värekarvat eivät ole kyllin tehokkaita suodattamaan mikrometrin kokoluokkaa olevia hiukkasia. Partikkeli, jonka aerodynaaminen halkaisija on alle $2,5\ \mu\text{m}$, määritellään pienhiukkaseksi [31]. Pienimmät hiukkaset ovat ihmiselle haitallisimpia, koska hienojakoiset pienhiukkaset aiheuttavat keuhkorakkuloissa tuhoa, mikä voi johtaa keuhkolaajentumaan ja muihin hengitys- ja verenkiertoelimistön sairauksiin.

Tavallinen tilanne kuitenkin on, että ei ole fyysisesti, taloudellisesti tai sosiaalisesti mahdollista rakentaa tarvittavaa rakennusta niin pitkän välimatkan päähän päästölähteistä, että terveysriski poistuisi kokonaan. On siis tarpeellista selvittää savukaasulähteen emissio ja konsentraatiot ja verrata sitä sallittuihin maksimiarvoihin. Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitos (THL) on määritellyt eri ilmansaasteille kynnysarvoja, joiden ylittäminen voi pitkällä aikavälillä aiheuttaa ennenaikaisen kuoleman [31]. EU-maissa vuonna 2010 pienhiukkaset ovat aiheuttaneet 380 000 [31] ennenaikaista kuolemaa.

Järkevä tilankäyttö vaatii terveysvaikutuksien ja etäisyyksien optimointia, mikä edellyttää luotettavaa tutkimustietoa voimalaitoksesta. Piipun tehollinen korkeus ja muut tarvittavat lähtötiedot saadaan joko mittaamalla tai taulukoista tilastodataan perustuvina parametreina. Tulevaisuudessa savunouseman mallinnus on yhä tärkeämpää, kun kasvava väestö tarvitsee jatkuvasti lisää asuinpaikkoja ja palveluita. Sen sijaan uusien voimalaitosten suunnittelua varten ei välttämättä voida hyödyntää valmista tutkimusdataa, vaan käytössä on ainoastaan tietoteknisten mallinnustyökalujen arviot. Voimalaitoksen savunouseman määrittäminen on syytä kehittää, koska ammattikäytössä olevien menetelmien täytyy olla luotettavia ja soveltua maantieteellisesti erilaisiin ja muuttuviin ympäristöihin.

6. YHTEENVETO

Termiseen voimalaitokseen liittyy savukaasupäästöjä, jotka koostuvat lämpimästä ilmasta, kiinteistä saastepartikkeleista, aerosoleista, vesihöyrystä ja -pisaroista ja kaasumaisista yhdisteistä. Ilmanlaadun paikallinen huononeminen estetään johtamalla savukaasut korkean piipun kautta mahdollisimman ylös, jolloin kaasut laimenevat ympäröivään ilmaan. Koska ilmakehässä tuulen nopeus kasvaa ylöspäin mentäessä, ideaalitulanteessa savu nousisi mahdollisimman korkealle. Savukaasuista pyritään pääsemään eroon, joten savunouseman korkeus on tärkeä tieto ympäristöterveyden kannalta.

Savunouseman korkeutta voidaan arvioida mittausdataan perustuvilla yksinkertaistetuilla korrelaatioilla, jotka tunnetaan yleispätevinä menetelminä. Approksimaatioita on ollut vaikuttavien tekijöiden paljouden vuoksi pakko tehdä, jotta analyttinen laskenta on ylipäättään mahdollista. Sääolosuhteiden täsmällinen mittaus ja yhtäaikainen huomiointi vaatii kuitenkin paljon laskentakapasiteettia, eikä yksittäisten parametrien tarkkuus välttämättä riitä. Nykyään käytetäänkin korrelaatioiden sijaan numeerisia menetelmiä, CFD-laskentaa. Suuri tarkkuus edellyttää suurta määrää dataa ja raskaita tietokoneohjelmistoja. Monet CFD-pohjaiset laskentamenetelmät ovat kalliita ja vaativat riittävän hyvän verkkoyhteyden. Yksinkertaistettuja korrelaatiota saatetaan nykyään käyttää lähinnä suuntaa antavaan arviointiin. Niitä voidaan siis edelleen tarvita, jos harkitaan savunouseman ominaisuuksien tarkempaa määrittystä.

Savukaasun leviämisen mallinnus tarkastelemalla hiukkaskonsentraatioita jollakin alueella onnistuu dispersiomallien avulla. Ennusteet alueellisista saatepitoisuuksista ovat yhä tärkeämpiä väestön kasvaessa, jolloin pienhiukkaspäästötkin ovat suuremmat. Erityisesti kaupunkiympäristöissä pienhiukkasia on huomattavia määriä, joten sillä on merkitystä, mihin voimalaitokset sijoitetaan.

LÄHTEET

- [1] Dr. Don W. Green; Dr. Marylee Z. Southard: Perry's Chemical Engineers' Handbook, 9th Edition. Air Pollution Management of Stationary Sources, Chapter (McGraw-Hill Professional, 2019), AccessEngineering
- [2] Ahmadi Orkomi, A., Ashrafi, K. and Motlagh, M.S., 2018. New plume rise modeling in a turbulent atmosphere via hybrid RANS-LES numerical simulation.
- [3] Tominaga, Y. and Stathopoulos, T., 2018. CFD simulations of near-field pollutant dispersion with different plume buoyancies. *Building and Environment*, **131**, pp. 128-139.
- [4] Ashrafi, K., Orkomi, A.A. and Motlagh, M.S., 2017. Direct effect of atmospheric turbulence on plume rise in a neutral atmosphere.
- [5] Yang, B. and Zhang, K.M., 2017. CFD-based turbulent reactive flow simulations of power plant plumes. *Atmospheric Environment*, **150**, pp. 77-86.
- [6] Tan Z. (2014) Air Dispersion. In: Air Pollution and Greenhouse Gases. Green Energy and Technology. Springer, Singapore © Zhonchao Tan
- [7] Alessandrini, S., Ferrero, E. and Anfossi, D., 2013. A new Lagrangian method for modelling the buoyant plume rise.
- [8] Tominaga, Y. and Stathopoulos, T., 2013. CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques.
- [9] Bieser, J., Aulinger, A., Matthias, V., Quante, M. and Denier van der Gon, H. A. C., 2011. Vertical emission profiles for Europe based on plume rise calculations. *Environmental Pollution*, **159**(10), pp. 2935-2946.
- [10] McGraw-Hill Professional, A., 2010. Water Environment Federation: Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: WEF Manual of Practice No. 8 ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76, Fifth Edition. Dispersion Modeling of Odors and Air Emissions, Chapter
- [11] Pregger, T. and Friedrich, R., 2009. Effective pollutant emission heights for atmospheric transport modelling based on real-world information.
- [12] Diez, F.J., Department of Mechanical and Aerospace Engineering and Rutgers University, Piscataway, New Jersey, 2008. Buoyant plumes in crossflows .
- [13] C. C. Lee, Shun Dar Lin and Handbook of Environmental Engineering Calculations, Second Edition, 2007. Calculations for Permitting and Compliance, Chapter (McGraw-Hill Professional), AccessEngineering
- [14] C. C. Lee; Shun Dar Lin: Handbook of Environmental Engineering Calculations, Second Edition. Air Emission Control, Chapter (McGraw-Hill Professional, 2007), AccessEngineering

- [15] Awasthi, S., Khare, M. and Gargava, P., 2006. General plume dispersion model (GPDM) for point source emission. *Environmental Modeling and Assessment*, **11**(3), pp. 267-276.
- [16] Diez, F.J., Bernal, L.P. and Faeth, G.M., 2005. PLIF and PIV measurements of the self-preserving structure of steady round buoyant turbulent plumes in cross-flow.
- [17] J. H. Lehr, M. Hyman, T. Gass and W. J. Seevers, 2002. Discharges of hazardous Waste Into The Atmosphere, Chapter (McGraw-Hill Professional,), AccessEngineering. *Handbook of Complex Environmental Remediation Problems*.
- [18] Janicke, U. and Janicke, L., 2001. A three-dimensional plume rise model for dry and wet plumes.
- [19] N. de Nevers (1995) Air Pollution Control Engineering. Second Edition, p. 143,158 University of Utah
- [20] James E. Carson & Harry Moses (1969) The Validity of Several Plume Rise Formulas, Journal of the Air Pollution Control Association, 862-866
- [21] Turner, J.S., 1969. Buoyant Plumes and Thermals. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **1**(1), pp. 29-44.
- [22] Suomen Tuulivoimayhdistys. Vertikaalinen tuuliprofiili. Saatavilla: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/mita-tuuli-on/tuuli-maanpinnalla/vertikaalinen-tuuliprofiili>. [21.04.2019]
- [23] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-figure-of-a-Gaussian-plume-The-effective-stack-height-H-and-the-crosswind-and_fig3_269105054 © István Lagzi [06.04.2019]
- [24] Tables_for_Gaussian_Plume_Model.pdf
- [25] http://www.taulukot.com/fysiikka/mekaniikka_termodynamiikka/#kaasujen_ominaisuuksia [25.03.2019]
- [26] <https://ptable.com/> [25.03.2019]
- [27] Ilmatieteen laitos Ilmastotilastot p. 0600 1 0600 [12.02.2019 ja 22.02.2019]
- [28] Tampereen sähkölaitos. Asiantuntija ympäristöinsinööri laura.laaksonen@sahkolaitos.fi
- [29] https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/443448/mod_resource/content/1/Kaava%20ja%20taulukkokokoelma.pdf s. 14 [29.04.2019]
- [30] https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html [29.04.2019]
- [31] <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet> [19.05.2019]

